

TEMPERATURNO-VLAŽNOSTNA POŽARNA ANALIZA LESENIH PREČNIH PREREZOV Z UPOŠTEVANJEM OGLENENJA

TEMPERATURE-MOISTURE FIRE ANALYSIS OF TIMBER CROSS-SECTIONS EXPOSED TO FIRE

izr. prof. dr. Simon Schnabl, univ. dipl. inž. grad.

simon.schnabl@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo

in kemijsko tehnologijo,

Večna pot 113, 1000 Ljubljana

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo

in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

prof. dr. Goran Turk, univ. dipl. inž. grad.

goran.turk@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo

in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 614.84:624.011.1(-047.58)

Povzetek | V članku je predstavljeno modeliranje obnašanja lesenih nosilcev, obremenjenih s požarom z ene ali več strani. V ta namen smo razvili računalniški program za napoved dvodimenzionalnega prehoda toplote in vlage v lesenih nosilcih, izpostavljenih požaru. Matematični model povezanega prehoda toplote in vlage predstavljata parcialni diferencialni enačbi s pripadajočimi robnimi pogoji. Model vključuje tudi oglenenje lesenih nosilcev, in sicer kot funkcijo njihove temperature, vlažnosti in gostote. Zaradi nelinearnosti osnovnih enačb smo rešitev dobili z numerično metodo končnih diferenc. Dobljene rezultate primerjamo z analitičnimi in eksperimentalnimi rešitvami, predstavljenimi v dostopni literaturi.

Ključne besede: požar, les, oglje, metoda končnih diferenc, vlaga

Summary | This paper describes the modelling of timber beam behaviour when one or more faces are exposed to fire. A computer program for the prediction of two-dimensional temperature and water content distribution in timber beams exposed to fire has been developed. The model consists of differential equations for coupled heat and moisture transfer with the corresponding boundary conditions. Furthermore, the model also predicts the char formation in wood beam as a function of its temperature, moisture and density. Owing to non-linear system of governing equations, the solution is obtained by numerical procedures such as finite difference method. Results obtained by numerical model are compared to the analytical solutions and experimental results published in the literature.

Key words: fire, timber, char, finite difference method, moisture

1 • UVOD

Človek uporablja les kot konstrukcijski material vse od njegovih prazgodovinskih začetkov. Dandanes se les kot konstrukcijski material uporablja v različnih industrijskih panogah. Zaradi njegovih izrednih lastnosti ga veliko uporabljajo arhitekti in oblikovalci sodobnih stavb. Sposobnost napovedati obnašanje lesa, ko je izpostavljen požaru, postaja s stališča požarne varnosti konstrukcij vse pomembnejša.

Namen pričujočega članka je študij in razumevanje oglenenja lesa z uporabo predstavljenega modela in primerjava rezultatov le-tega z rezultati enodimenzionalnih modelov oglenenja in eksperimentalnimi rezultati, predstavljenimi v literaturi. Pri numerični analizi mehanskega obnašanja lesenih nosilcev v primeru požara predstavljajo deformacije zaradi krčenja in nabrekanja, spremembe temperature, viskoznega lezenja in mehanosorptivnih vplivov zelo pomembno vlogo. Razvoj vseh omenjenih deformacij je tesno povezan z

dejanskim stanjem temperature in vlažnosti v lesenih nosilcih. Posledično predstavlja prostorska in časovna določitev temperature in vlažnosti po elementu skladno z robnimi pogoji okolja prvo zelo pomembno fazo v analizi lesenih nosilcev pri požaru ((Fredlund 1993), (Schnabl, 2007)).

Les je gorljiv material. Izpostavljen požaru je podvržen toplotni degradaciji oziroma tako imenovani pirolizi. Piroliza je kompleksen pojav. Predstavlja medsebojno ali vzajemno delovanje raznih kemijskih procesov s procesom prehoda toplote in vlage. Posledica toplotne degradacije lesa je, da ta razpade na oglje in različne pline (ogljikov dioksid, ogljikov hidrat). Posledično se spremenijo lastnosti lesa, na primer njegova gostota ter toplotna prehodnost. Piroliza ali toplotna degradacija lesa se prične, ko temperatura lesa doseže neko mejno vrednost, ki je odvisna od vrste lesa in je običajno okoli 300 °C ((Janssens 2004), (Lawson, 1952), (White, 1992)).

Pomembnost in zahtevnost toplotne degradacije lesa je tudi vzrok velikemu številu člankov na temo toplotne degradacije in oglenenja lesa kot poroznega materiala, a natančen pregled literature ni namen pričujočega dela. Čeprav eksperimentalna opažanja potrjujejo vzajemno delovanje gradientov temperature in vlage v lesu, je to le redko upoštevano v analizi obnašanja oglenenja lesa med požarom. V članku je predstavljen časovno spremenljiv povezan prehod toplote in vlage v lesenih nosilcih, izpostavljenih standardnim pogojem požara.

Predpostavka o homogenosti temperature in vsebnosti vlage vzdolž nosilca nam omogoča, da upoštevamo le dvodimenzionalne Luikove (Luikov, 1966) enačbe prečnega prereza lesenega nosilca. Pravokotnost prereza nam omogoča, da uporabimo metodo končnih diferenc z ekvidistantno mrežo diferencnih točk po prerezu obravnavanega lesenega nosilca. Integracija po prostoru je izvedena s simetričnimi formulami, osnovanimi na kvadratnih oblikovnih funkcijah, medtem ko so za časovno integracijo izbrane linearne oblikovne funkcije ((Gams, 2003), (Turk, 1987)).

2 • TEORETIČNE OSNOVE

2.1 Osnovne enačbe prevajanja toplote in vlage

Osnovne enačbe povezanega prevajanja toplote in vlage v kapilarno poroznih snoveh, kot je na primer les, je podal že Luikov (Luikov, 1966). Povezano prevajanje toplote in vlage torej opisujeta dve nelinearni parcialni diferencialni enačbi drugega reda. Izpeljani sta z uporabo zakona o ohranitvi energije in mase infinitezimalno majhnega dela snovi. Z upoštevanjem naslednjih predpostavk:

- les in oglje sta homogena in ortogonalno anizotropna,
 - gravitacijske sile so veliko manjše od sil, ki nastopajo v kapilah,
 - lastnosti lesa in oglja so odvisne od temperature in vlage,
 - krčenje in nabrekanje lesa ter oglja sta zanemarljivi,
 - masa plinov oziroma hlapov je zanemarljiva, masni tok je sestavljen le iz toka kapljevine,
 - hitrost pretoka kapljevine skozi les je zanemarljiva,
- se omenjeni enačbi glasila

$$\frac{\partial(\rho c_q T)}{\partial t} = \nabla \left[\left(\mathbf{k}_q + \frac{\varepsilon_m \lambda_e \mathbf{k}_m \delta}{c_m} \right) \nabla T + \varepsilon_m \lambda_e \mathbf{k}_m \nabla w \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho c_m w)}{\partial t} = \nabla \left[\left(\frac{\mathbf{k}_m \delta}{c_m} \right) \nabla T + \mathbf{k}_m \nabla w \right], \quad (2)$$

kjer je T temperatura (°C), w je potencial vlage (°M), ρ je gostota snovi (kg/m³), c_q je specifična toplota snovi (J/kgK), c_m je specifična toplota vlage (J/kg °M), t je čas (s), ε_m je delež vlage v plinastem stanju, λ_e je izparilna toplota snovi (J/kg), \mathbf{k}_q je simetrični tenzor toplotne prevodnosti (W/mK), \mathbf{k}_m je tenzor prevodnosti vlage (kg/ms °M), $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ je operator nabra.

Enačba (1) je enačba prevajanja toplote skozi snov. Toplota se ne prevaja samo zaradi gradientov temperature (Fourierjev zakon), temveč tudi zaradi latentne toplote izparevanja in spremembe potenciala vlage (Dufourjev efekt). Slednji je običajno v primeru lesa zanemarljiv. Podobno enačba (2) predstavlja enačbo pretoka mase skozi snov. Masa, v našem primeru je to vlaga, se ne prenaša samo zaradi

gradientov vlage (Fickov zakon), ampak tudi zaradi gradientov temperature (Soretov efekt). Enačbi (1)–(2) predstavljata torej enačbi za potenciala temperature in vlage. To pomeni, da dobimo rezultate, izražene s potencialoma °C in °M. Običajno je vlažnost lesa V v praksi definirana kot delež vode glede na maso suhega vzorca lesa, torej ima enoto (kg/kg). Vlažnost lesa V pa je s potencialom vlage w povezana preko linearne zveze (Luikov, 1966) $V = c_m w$. (3)

Enačbi (1)–(2) lahko enolično rešimo, če poznamo ustrezne začetne in robne pogoje. Začetni pogoji predpisujejo temperaturo in potencial vlage po prečnem prerezu ob začetnem času $t=0$

$$T(y, z, t=0) = T_0(x, y), \quad (4)$$

in

$$w(y, z, t=0) = w_0(x, y). \quad (5)$$

Robni pogoji, upoštevani v članku, so dveh tipov, in sicer:

- predpisana toplotni in vlažnostni tok sta linearno odvisna od razlike med temperaturo in potencialom vlage na robu in v okolici (naravna in prisiljena konvekcija),
- predpisana toplotni in vlažnostni tok sta nelinearno odvisna od razlike med temperaturo in potencialom vlage na robu in v okolici.

Robni pogoj toplotnega prehoda dodatno upošteva vpliv latentne toplote izparevanja, vlažnostni robni pogoj pa vpliv temperaturnega gradienta. Robni pogoji na izpostavljenih zunanjih površinah izenačujejo toplotni pretok s prevajanjem in vlažnostni pretok po elementu s pretokom, ki je posledica radiacije in konvekcije toplote oziroma konvekcijo vlage med prečnim prerezom in okolico. Robni pogoji se glasijo

$$-k_q \nabla T n = h_q (T - T_A) + \varepsilon_R \sigma (T^4 - T_A^4) + (1 - \varepsilon_m) \lambda_v h_m (w - w_A), \quad (6)$$

$$-k_m (\nabla w + \delta \nabla T) n = h_m (w - w_A), \quad (7)$$

kjer je n zunanja normala na mejno ploskev, h_q je toplotni prestopni koeficient ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), h_m je vlažnostni prestopni koeficient ($\text{kg}/\text{sm}^2 \text{ } ^\circ\text{M}$), T_A in w_A sta temperatura in potencial vlažnosti okolice (ambienta), ε_R je efektivna površinska emisivnost zunanjega roba prečnega prereza in σ je Stephan-Boltzmannova konstanta radiacije ($\sigma = 5.671 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$). Enačbe (1)–(7) tvorijo začetni robni problem povezanega dvodimenzionalnega prehoda toplote in vlage po lesenem prečnem prerezu, ki je izpostavljen požaru.

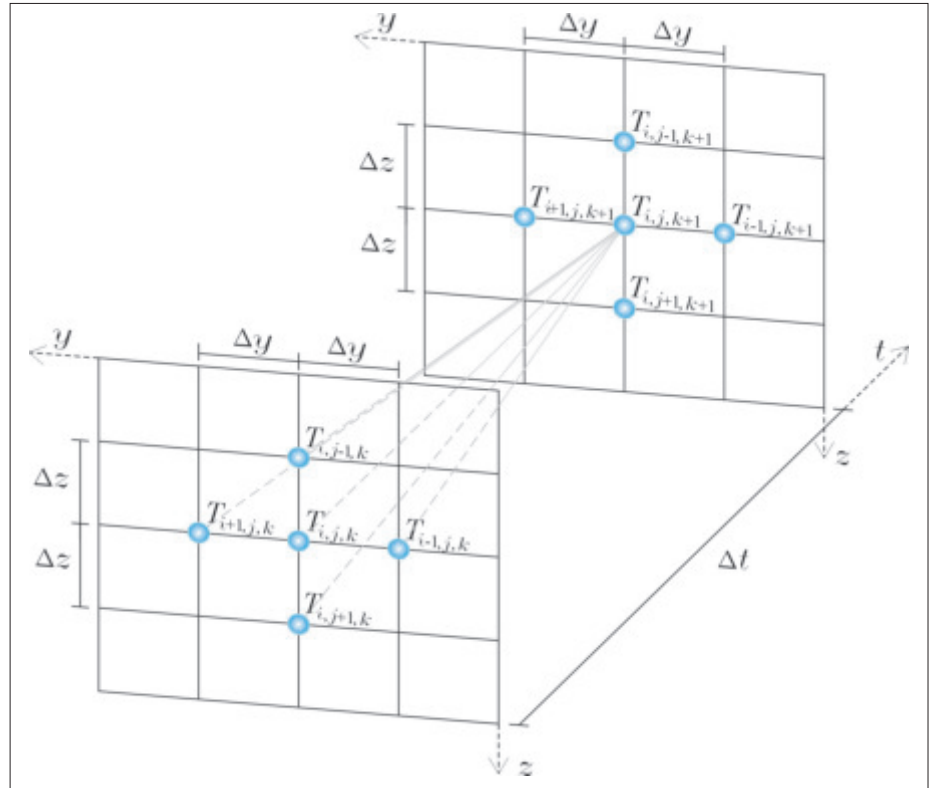
2.2 Diskretizacija – metoda končnih diferenc

V naravi so problemi povezanega prehoda toplote in vlage praviloma vedno nelinearni in nestacionarni. To je še bolj izrazito v primeru požara. Analitične rešitve enačb (1)–(7) torej v takih primerih niso mogoče. Reševanje je v takih primerih možno le z uporabo ustrezne numerične metode. V članku v ta namen uporabimo metodo končnih diferenc. Pri tej metodi zvezni problem povezanega prehoda toplote in vlage, ki ga opisujeta enačbi (1) in (2), ter robne pogoje (6)–(7) diskretiziramo tako, da neznane funkcije in njihove odvode aproksimiramo z množico točkovnih vrednosti v znanih vnaprej izbranih točkah diferenčne mreže. Potek med posameznimi točkami pa interpoliramo z izbiro ustreznih oblikovnih funkcij. V konkretnem primeru je izbira oblikovnih funkcij relativno preprosta. Izberemo kvadratni potek temperature in potenciala vlage po kraju in linearni potek teh količin po času. Z znanimi oblikovnimi funkcijami lahko temperaturo in potencial vlage v poljubni točki zapišemo kot vsoto njunih vrednosti v diskretnih točkah izbrane diferenčne mreže. V našem primeru temperaturo in potencial vlage zapišemo z naslednjima enačbama

$$T(x, y, t) = \sum_{l=i-1}^{i+1} \sum_{m=j-1}^{j+1} \sum_{n=k}^{k+1} T_{l,m,n} N_{l,m} M_k, \quad (8)$$

$$w(x, y, t) = \sum_{l=i-1}^{i+1} \sum_{m=j-1}^{j+1} \sum_{n=k}^{k+1} w_{l,m,n} N_{l,m} M_k, \quad (9)$$

kjer so $T_{l,m,n}$ in $w_{l,m,n}$ točkovne vrednosti temperature in potenciala vlage v točkah diferenčne mreže, $N_{l,m}$ so krajevne in M_k časovne oblikovne funkcije. Indeks i označuje koordinato y , indeks j koordinato z ter indeks k čas (slika 1).



Slika 1 • Oznake temperatur v izbranih točkah diferenčne mreže pri dveh različnih časih.

V enačbah (1)–(7) nastopajo prvi in drugi odvodi neznanih funkcij. Z upoštevanjem odvodov izbranih oblikovnih funkcij in brezdimenzijskih koordinat (Gams, 2003) lahko aproksimirane izraze, ki jih potrebujemo v enačbah (1)–(7), v razviti obliki zapišemo na naslednji način:

$$T = (1 - t_b) T_{i,j,k} + t_b T_{i,j,k+1}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{(1 - t_b)}{2\Delta y} (T_{i+1,j,k} - T_{i-1,j,k}) + \frac{t_b}{2\Delta y} (T_{i+1,j,k+1} - T_{i-1,j,k+1}), \quad (11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{(1 - t_b)}{2\Delta z} (T_{i,j+1,k} - T_{i,j-1,k}) + \frac{t_b}{2\Delta z} (T_{i,j+1,k+1} - T_{i,j-1,k+1}), \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{(1 - t_b)}{\Delta y^2} (T_{i+1,j,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i-1,j,k}) +$$

$$+ \frac{t_b}{\Delta y^2} (T_{i+1,j,k+1} - 2T_{i,j,k+1} + T_{i-1,j,k+1}), \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{(1 - t_b)}{\Delta y^2} (T_{i,j+1,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i,j-1,k}) + \frac{t_b}{\Delta z^2} (T_{i,j+1,k+1} - 2T_{i,j,k+1} + T_{i,j-1,k+1}), \quad (14)$$

$$w = (1 - t_b) w_{i,j,k} + t_b w_{i,j,k+1}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{(1 - t_b)}{2\Delta y} (w_{i+1,j,k} - w_{i-1,j,k}) + \frac{t_b}{2\Delta y} (w_{i+1,j,k+1} - w_{i-1,j,k+1}), \quad (16)$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} = \frac{(1 - t_b)}{2\Delta z} (w_{i,j+1,k} - w_{i,j-1,k}) + \frac{t_b}{2\Delta z} (w_{i,j+1,k+1} - w_{i,j-1,k+1}), \quad (17)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{(1 - t_b)}{\Delta y^2} (w_{i+1,j,k} - 2w_{i,j,k} + w_{i-1,j,k}) + \frac{t_b}{\Delta y^2} (w_{i+1,j,k+1} - 2w_{i,j,k+1} + w_{i-1,j,k+1}), \quad (18)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = \frac{(1 - t_b)}{\Delta y^2} (w_{i,j+1,k} - 2w_{i,j,k} + w_{i,j-1,k}) + \frac{t_b}{\Delta z^2} (w_{i,j+1,k+1} - 2w_{i,j,k+1} + w_{i,j-1,k+1}), \quad (19)$$

$$\rho = (1-t_b)\rho_{i,j,k} + t_b\rho_{i,j,k+1}, \quad (20)$$

$$\frac{\partial k_y}{\partial y} = \frac{(1-t_b)}{2\Delta y} \left((k_y)_{i+1,j,k} - (k_y)_{i-1,j,k} \right) + \frac{t_b}{2\Delta y} \left((k_y)_{i+1,j,k+1} - (k_y)_{i-1,j,k+1} \right), \quad (21)$$

$$\frac{\partial k_z}{\partial z} = \frac{(1-t_b)}{2\Delta z} \left((k_z)_{i+1,j,k} - (k_z)_{i-1,j,k} \right) + \frac{t_b}{2\Delta z} \left((k_z)_{i+1,j,k+1} - (k_z)_{i-1,j,k+1} \right). \quad (22)$$

V izrazih (10)–(22) smo s $t_b \in [0,1]$ označili brezdimenzijski čas kot prosti parameter. Diferenčna metoda s prostim parametrom t_b se imenuje splošna diferenčna metoda. Glede na izbiro t_b se diferenčna metoda deli na: *čisto eksplicitno* ali *Eulerjevo* metodo ($t_b=0$), *Crank-Nicolsonovo* metodo ($t_b=0,5$), *Galerkinovo* metodo ($t_b=0,67$) in *čisto implicitno* metodo ($t_b=1$). Z vstavitvijo izrazov (10)–(22) v enačbe (1)–(7) dobimo enačbe za izračun neznanih točkovnih vrednosti temperature in potenciala vlage v točkah diferenčne mreže prereza (slika 2). Izrazi so zelo obsežni, zato jih v članku ne prikažemo.

robne in vogalne točke izpeljemo z uporabo simetričnih ali nesimetričnih formul ((Turk 1987), (Gams, 2003)).

2.3 Modeli oglelenja

Les je vnetljiv in gorljiv material. Izpostavljen požaru oziroma visokim temperaturam je podvržen toplotni degradaciji oziroma tako imenovani pirolizi. Piroliza lesa je izjemno kompleksen proces. Predstavlja vzajemno delovanje raznih kemijsko-fizikalnih procesov s procesom prehoda toplote in vlage. Les pri visokih temperaturah požara poka, se krči in postane črn. Pravimo, da ogleni. Pri temperaturi nekje med 270 in 300 °C se vname. To temperaturo imenujemo vnetišče lesa.

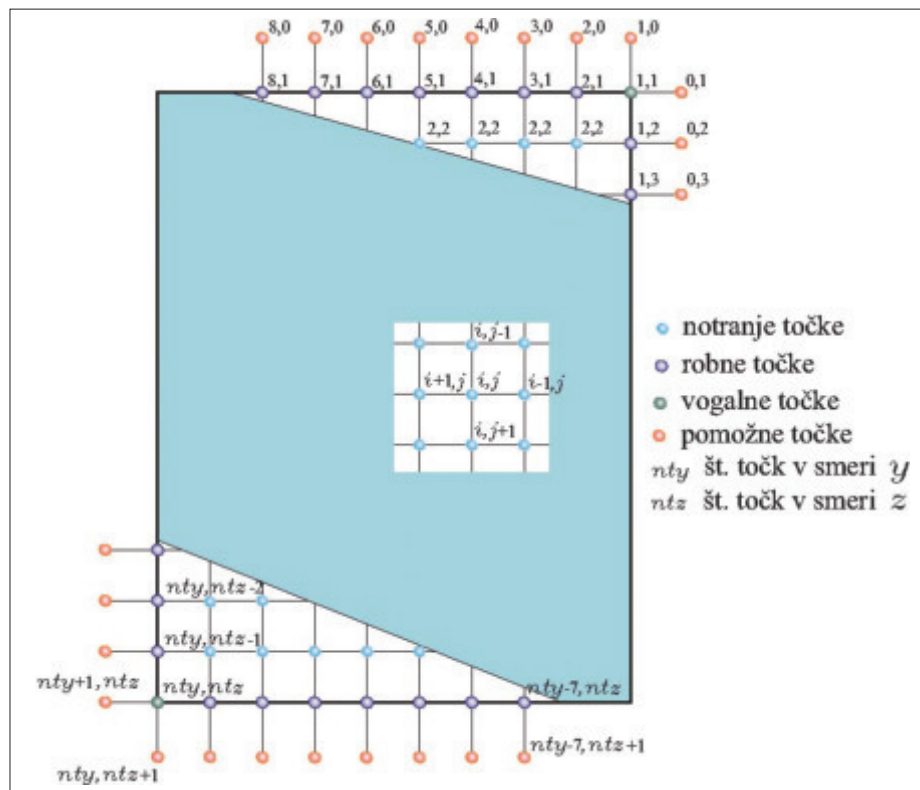
V literaturi obstaja kar nekaj modelov za opis obnašanja lesa pri visokih temperaturah. Delijo se na empirične in numerične modele oglelenja. Empirični modeli temeljijo na eksperimentalnih rezultatih lesenih elementov pri požaru. Dobljene empirične formule za določitev debeline oglja oziroma hitrosti

notranjost nosilca, izpostavljenega požaru. V veliki večini primerov imajo empirični modeli oglelenja lesa splošno obliko

$$\frac{\partial x}{\partial t} \approx a^n, \quad (23)$$

kjer pomeni $\frac{\partial x}{\partial t}$ hitrost oglelenja, x je debelina oglja, t je čas izpostavljenosti požaru, a in n pa sta regresijski konstanti, ki ju določimo s kalibracijo z eksperimentalnimi rezultati. Se pa empirični modeli delijo tudi glede na vrsto požarne obtežbe. Tako obstajajo empirični modeli za standardne požare ((Lawson, 1952), (Schaffer, 1965), (AS, 1990), (White, 1992), (SIST, 2005)) ter nestandardne požare in požare s konstantno temperaturo ((Shaffer, 1965), (Leceister, 1983), (Mikkola, 1990), (Lau, 1999)). Alternativno lahko namesto empiričnih uporabimo numerične/matematične modele oglelenja. V literaturi je najti zelo malo matematičnih modelov za opis oglelenja lesa. Le-ti pa se razlikujejo glede na stopnjo opisa fizikalnih in kemijskih procesov, ki potekajo v lesu med požarom. Večina modelov upošteva samo prehod toplote brez upoštevanja vlage (Takeda, 2003), nekateri tudi vlago ((Janssens, 2004), (Pečenko, 2015)), medtem ko drugi poleg prehoda toplote in mase (vlaga, plini, smole itd.) upoštevajo še koncentracijo kisika v zraku in krčenje oglja (Fredlund, 1993).

V članku predlagani matematični model za opis oglelenja ni tako splošen, kot je model Fredlunda (Fredlund, 1993). Zanimari namreč vpliv tlaka in konvekcijskega dela toka tekočine (vlage in drugih produktov pirolize). Upošteva pa lahko temperaturno in vlažnostno odvisne termomehanske lastnosti lesa pri povišanih temperaturah požara. Ker pa je te podatke težko pridobiti iz literature ali pa jih sploh ni, smo v članku prikazali izpeljanko modela, ki v procesu pirolize upošteva le dve materialni fazi, to sta les in oglje. Temperatura vnetišča lesa je v tem primeru 300 °C. To pomeni, da do te temperature rešujemo enačbe (1)–(7) za les, nad to temperaturo pa za oglje. V nadaljevanju prikažemo rezultate.



Slika 2 • Oznake vozlišč izbrane diferenčne mreže glede na lego v prerezu.

enačbama (1)–(2) moramo zadostiti tudi v robnih točkah. To pomeni, da moramo izraze (10)–(20) zapisati v robnih točkah. V ta namen moramo vpeljati pomožna vozlišča diferenčne mreže z namišljenimi vrednostmi temperature in potenciala vlage. Enačbe za

ogledenja so lahko odvisne od različnih parametrov, kot so vsebnost vlage, gostota lesa, vrsta lesa, tip požarne obtežbe, temperatura vnetišča lesa itd. Ogleenje lesa navadno opišejo s hitrostjo zmanjševanja mase lesa (g/s) ali s hitrostjo širjenja oglja (mm/s) v

3 • NUMERIČNI PRIMERI

3.1 Enodimenzionalno oglenenje

3.1.1 Primerjava z empiričnimi modeli

V literaturi obstajajo predvsem empirični modeli za opis enodimenzionalnega oglenjenja lesa s konstantnimi materialnimi lastnostmi pri standardnem požaru. Zato izberemo za primerjavo v članku predlaganega matematičnega modela primer enodimenzionalnega gorenja smrekovega nosilca debeline d , ki je izpostavljen standardnemu požaru (ISO, 1999). Materialne podatke obravnavanega smrekovega nosilca sta podala Chang in Weng (Chang, 2000) in so naslednji:

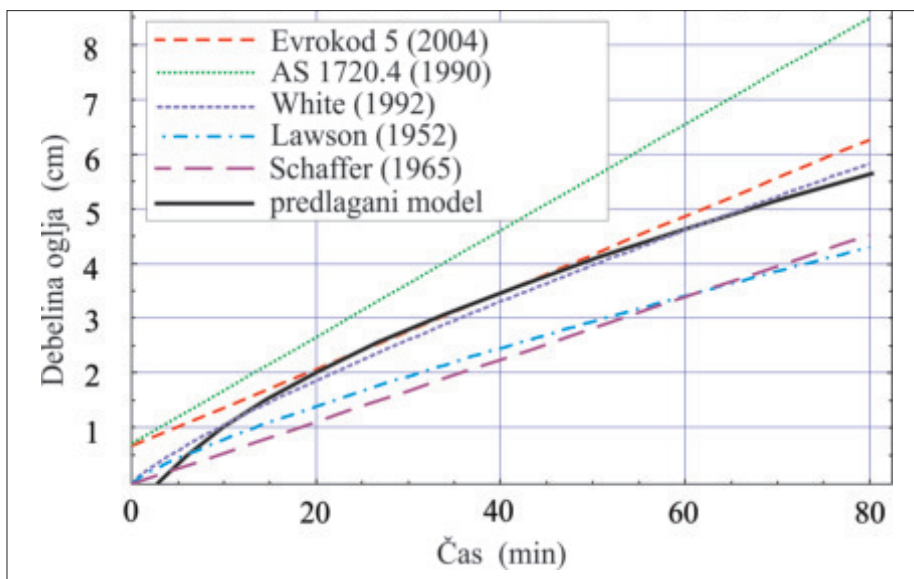
$$T_0 = 20^\circ\text{C}, w_0 = 13^\circ\text{M}, w_A = 4^\circ\text{M}, \rho^{\text{les}} = 370 \text{ kg/m}^3, \rho^{\text{ogljje}} = 110 \text{ kg/m}^3, k_q^{\text{les}} = 0,12 \text{ W/mK},$$

$$k_q^{\text{ogljje}} = 0,15 \text{ W/mK}, k_m^{\text{les}} = k_m^{\text{ogljje}} = 2,2 \times 10^{-8} \text{ kg/ms}^\circ\text{M}, c_q^{\text{les}} = 1530 \text{ J/kgK}, c_q^{\text{ogljje}} = 1050 \text{ J/kgK},$$

$$c_m^{\text{les}} = c_m^{\text{ogljje}} = 0,01 \text{ kg/kg}^\circ\text{M}, h_q^{\text{les}} = h_q^{\text{ogljje}} = 22,5 \text{ W/m}^2\text{K}, h_m^{\text{les}} = h_m^{\text{ogljje}} = 2,5 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2\text{s}^\circ\text{M},$$

$$\varepsilon_m = 0,3, \delta = 2,0^\circ\text{M} / \text{K}, \varepsilon_R = 0,9, d = 0,3 \text{ m}.$$

Primerjava rezultatov je prikazana na sliki 3.



Slika 3 • Primerjava predlaganega modela oglenjenja z izbranimi empiričnimi modeli.

Vidimo, da večina empiričnih modelov predlaga konstantno hitrost oglenjenja ((Schaffer, 1965), (SIST, 2005), (AS, 1990)). Upoštevanje konstantne hitrosti oglenjenja je pripravno, a ne odraža dejanskega poteka oglenjenja lesa. Nelinearni model enodimenzionalnega oglenjenja so predlagali Lawson s sodelavci (Lawson, 1952) ter White in Nordheim (White, 1992). Iz primerjave rezultatov je razvidno, da se v večini primerov razlike med posameznimi modeli s časom povečujejo. Razlika v debelini oglja, ki jo

predlagata avstralski standard AS 1720.4 (AS, 1990) in Shaffer (Shaffer, 1965), je po 80 minutah skoraj 100%. Opaziti je dobro ujemanje predlaganega modela z modeloma, ki ju predlagajo (SIST, 2005) ter White in Nordheim (White, 1992). S slike 3 se tudi vidi, da empirični modeli, ki jih primerjamo, predpostavljajo začetek oglenjenja takoj ob nastopu požarne obtežbe. To seveda ne predstavlja dejanskega stanja. V predlaganem modelu je upoštevano, da les začne ogleneti, ko doseže temperaturo vnetišča, to je 300°C . To se zgodi približno 3 minute po začetku požara.

3.1.2 Primerjava z eksperimentalnimi in numeričnimi rezultati

Rezultate predlaganega modela smo primerjali tudi z rezultati švedskega raziskovalca Fredlunda (Fredlund, 1993), ki je eksperimentalno in numerično obravnaval primer smrekovega nosilca z začetno vrednostjo vlage 14,5%. Pri numeričnih izračunih je uporabil temperaturno odvisne termomehanske lastnosti lesa pri visokih temperaturah. Te lastnosti je določil z eksperimenti. Te tem-

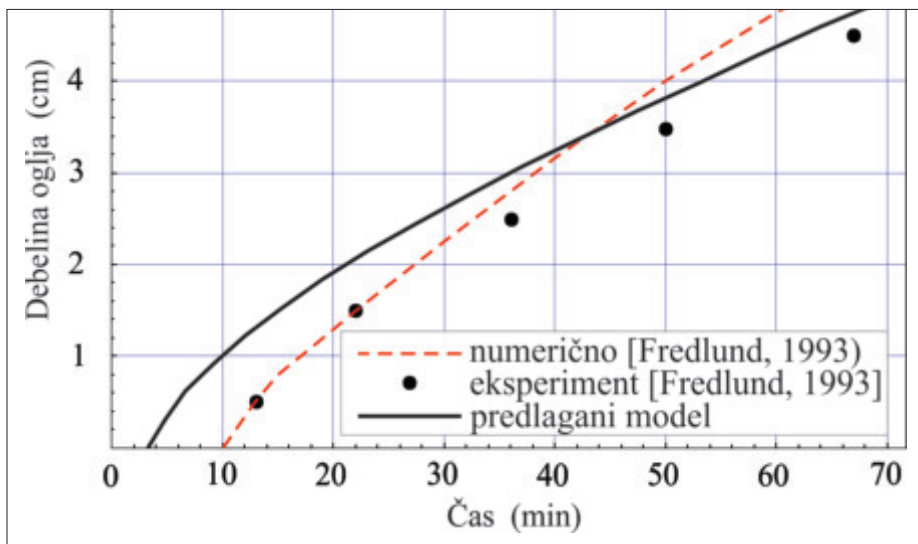
peraturno odvisne lastnosti lesa smo upoštevali tudi v predlaganem matematičnem modelu. Primerjava rezultatov je podana na sliki 4.

Primerjava pokaže, da se modela razlikujeta predvsem glede časa, ko les začne ogleneti, kar je lahko posledica različno uporabljene definicije oglenjenja. V (Fredlund, 1993) je nastanek oglja definiran kot stanje, ko specifična gostota lesa pade pod 300 kg/m^3 , medtem ko v predlaganem modelu oglje nastane, ko les doseže temperaturo 300°C . Vidimo, da se razlika med modeloma s časom zmanjšuje do približno 45 minut, ko je debelina oglja v obeh primerih enaka. Primerjava obeh modelov z eksperimentalnimi rezultati je v obeh primerih v okviru inženirske natančnosti relativno dobra. Na začetku je model Fredlunda (Fredlund, 1993) bližje rezultatom eksperimenta, po 45 minutah pa se rezultati v članku predlaganega modela tem rezultatom bolj prilagajajo. Fredlundov model v tem časovnem območju precenjuje hitrost oglenjenja.

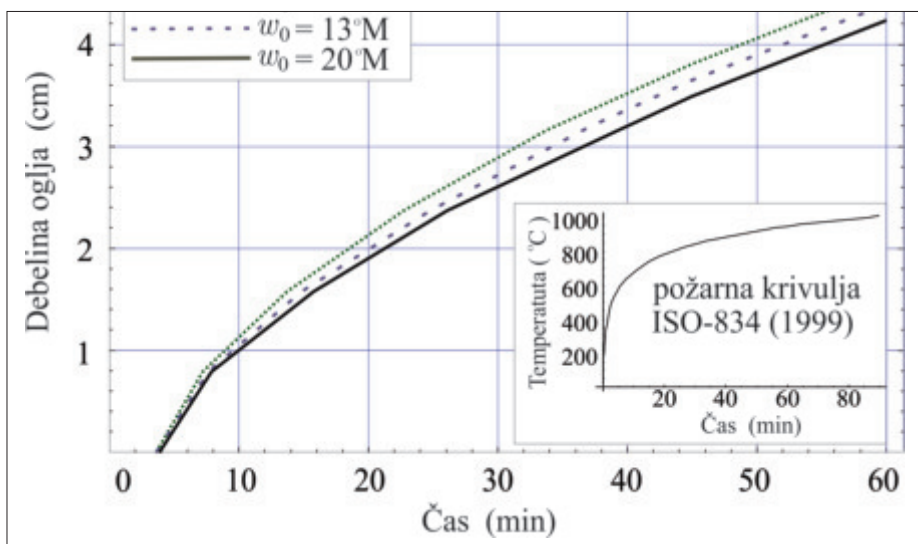
3.1.3 Parametrična študija

V članku predstavljeni numerični model za oglenenje lesa smo uporabili v parametrični študiji, s katero smo želeli ugotoviti vpliv začetne vlažnosti w_0 in specifične gostote lesa σ^{les} na obnašanje lesenih prerezov pri standardnem požaru. V ta namen smo za različne vrednosti začetne vlage in specifične gostote lesa izračunali debelino oglja pri različnih časih požara. Drugi podatki lesenega prečnega prereza so bili enaki kot v primeru 3.1.1. Vpliv začetne vlažnosti na debelino oglja je prikazan na sliki 5.

S slike 5 je razvidno, da se z večanjem začetne vlažnosti lesa hitrost oglenjenja zmanjšuje, medtem ko je vpliv začetne vlažnosti lesa na začetek oglenjenja zanemarljiv. Hitrost oglenjenja je tako pričakovano najvišja v primeru suhega lesa ($w_0=5^\circ\text{M}$). Razlika debelin oglja v primeru suhega lesa in lesa začetne vlažnosti $w_0=20^\circ\text{M}$ znaša po približno eni uri 0,4 cm. Vpliv vlage je najbolj izrazit v prvih 30 minutah. Čas, potreben za dosego določene debeline oglja, je v primeru različnih vlažnosti zelo različen. Tako za enako debelino oglja, na primer 3 cm, potrebuje suh les okoli 8 minut manj kot les z začetno vlažnostjo 20°M . Omenjeni časovni zamik namreč bistveno vpliva na nosilnost lesenih elementov. Zaključimo lahko, da ima začetna vlažnost pomemben vpliv na oglenenje lesa.



Slika 4 • Primerjava numeričnih in eksperimentalnih rezultatov debeline oglja.



Slika 5 • Vpliv začetne vlažnosti lesa na debelino oglja pri standardnem požaru.

Vpliv specifične gostote lesa na oglenenje lesenega prereza pri standardnem požaru prikazuje slika 6.

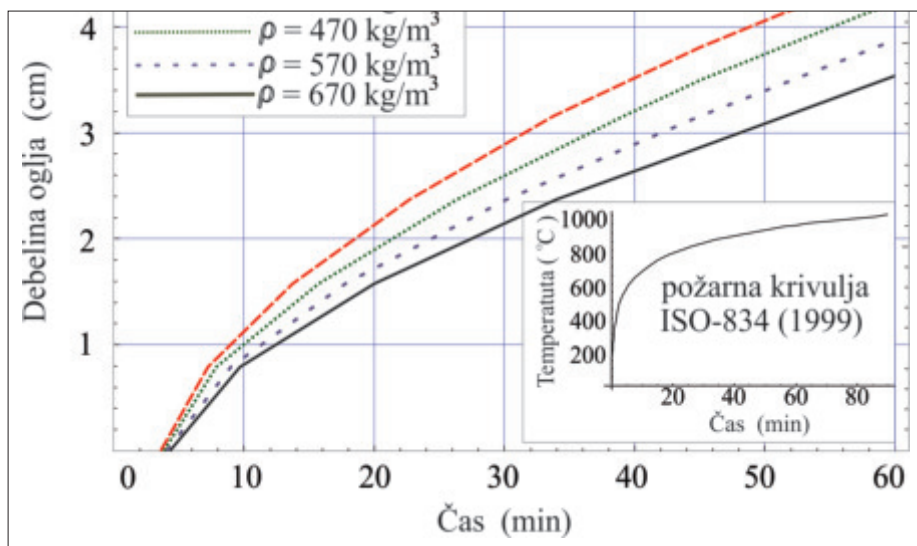
Vidimo, da ima specifična gostota lesa velik vpliv na oglenenje le-tega. Les z višjo gostoto začne ogleneti pozneje in ogleni počasneje kot les z nižjo gostoto. Razlike v debelini oglja se v primeru različnih specifičnih gostot lesa s časom povečujejo. Pri času 60 min. je debelina zoglenega lesa z $\rho \approx 370 \text{ kg/m}^3$ približno za 35 % večja kot v primeru, ko je $\rho \approx 670 \text{ kg/m}^3$.

3.2 Dvodimenzionalno oglenenje

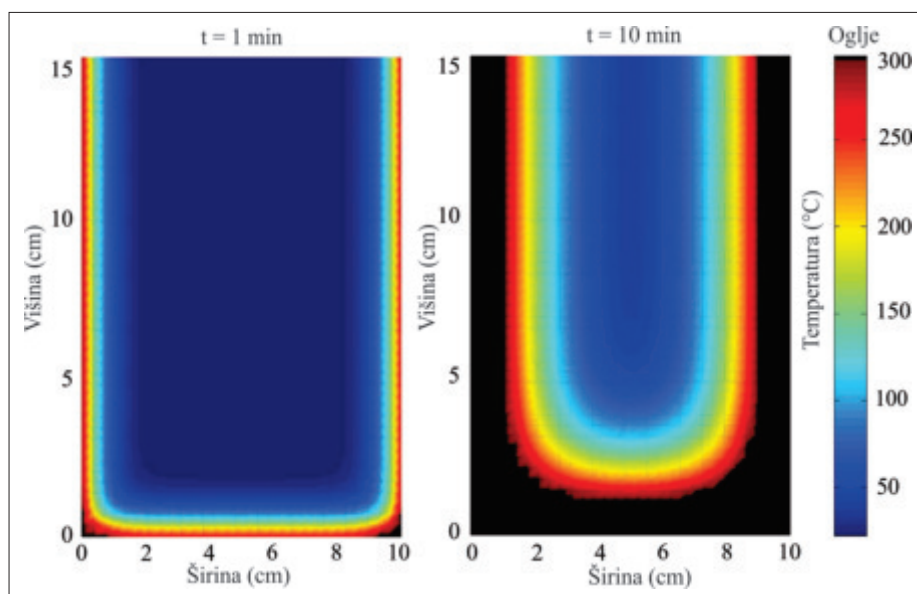
V tem primeru obravnavamo oglenenje homogenega lesenega prečnega prereza, ki je izpostavljen standardnemu požaru (ISO, 1999) s treh strani, medtem ko je zgornji rob prečnega prereza toplotno in vlažnost-

no izoliran. Začetni prečni prerez nosilca je pravokotne oblike dimenzij $b \times h = 10 \times 15 \text{ cm}$. Prečni prerez diskretiziramo z ekvidistantno diferenčno mrežo točk. Pri izračunu uporabimo enake materialne lastnosti kot pri enodimenzionalnem primeru. Rezultati simulacije izpostavljenosti pri časih 1, 10, 20 in 30 minut so prikazani na slikah 7 in 8.

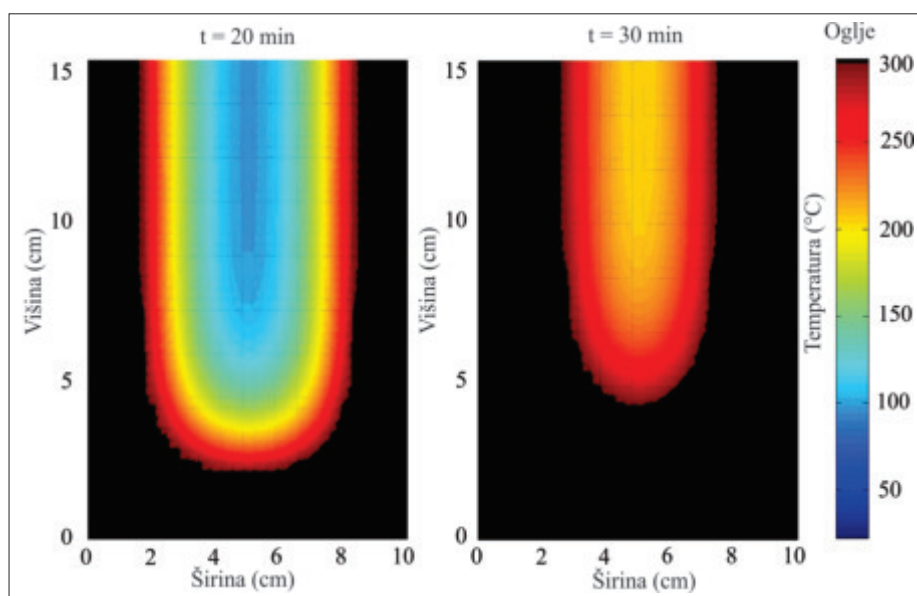
S slike 7 se vidi, da so vogali prečnega prereza izpostavljeni prehodu toplote z dveh strani. Posledično je oglenenje najhitrejše v vogalih prečnega prereza. Tam se namreč tudi vedno začne. Pojavi se tako imenovani zaokrožitveni efekt, ki ima za posledico spreminjanje oblike aktivnega prečnega prereza. Tako začetno pravokoten prečni prerez kmalu po začetku gorenja lesa ni več pravokoten.



Slika 6 • Vpliv specifične gostote lesa na debelino oglja pri standardnem požaru.



Slika 7 • Porazdelitev temperature po prečnem prerezu smrekovega nosilca in degradacija lesa v oglje pri 1. in 10. minuti požara.



Slika 8 • Porazdelitev temperature po prečnem prerezu smrekovega nosilca in degradacija lesa v oglje pri 20. in 30. minuti požara.